

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 102 40 204.3

**Anmeldetag:** 28. August 2002

**Anmelder/Inhaber:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
Köln/DE;  
ESM Andersen Instruments GmbH, Erlangen/DE

**Erstanmelder:** Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V., Köln/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zur optischen Messung von schwarzem  
Kohlenstoff in der Atmosphäre und Einrichtung zur  
Durchführung des Verfahrens

**IPC:** G 01 N 21/59

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 4. August 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to read "M. Schreyer".

Kostenlos

**Dipl.-Ing. A. v. Kirschbaum**  
**Patentanwalt**

D-82110 Germering  
Waldstraße 2b  
Telefon: (089) 89 42 73 22

Anwaltsakte: DFO-10276

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Linder Höhe  
51147 Köln

---

Verfahren zur optischen Messung von schwarzem Kohlenstoff  
in der Atmosphäre und Einrichtung zur Durchführung  
des Verfahrens

---

Die Erfinlung betrifft ein Verfahren zur optischen Messung von schwarzem Kohlenstoff in der Atmosphäre sowie ein Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

- 5 Schwarzer Kohlenstoff (Ruß) stellt die Leitkomponente für partikelförmige Emissionen aus unvollständigen Verbrennungsprozessen dar. Diese Emissionen sind in Deutschland wegen ihrer gesundheitsschädigenden Wirkung durch eine Verordnung auf einen Jahresmittelwert von  $8\mu\text{g m}^{-3}$  begrenzt.

10

- Bisher ist die Messung des schwarzen Kohlenstoffs in der Luft durch ein thermisches Verfahren nach VDI 2465 Blatt 1/2 vorgeschrieben. In dieser VDI-Richtlinie sind für Deutschland thermische Verfahren als Referenzverfahren für die Immissionsmessung des schwarzen Kohlenstoffs festgelegt. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden Tages- oder Wochenfilter analysiert. Damit ist man allerdings nicht in der Lage, zeitlich aufgelöste Messdaten zu liefern.

- 20 Zur optischen Messung des schwarzen Kohlenstoffs wird bisher das luftgetragene Aerosol auf einem Einzelfilter oder einem Filterband deponiert. Die Veränderung der optischen Eigenschaften der partikelbeladenen Filtermatrix gegenüber der partikelfreien Matrix wird entweder in Transmission (TRANS) oder 25 in Reflexion (REF) bestimmt. Aus der Veränderung der Filterschwärzung durch die Partikelbeladung wird über eine einfache, vom Lambert-Beer'schen Gesetz abgeleitete Beziehung auf die Massenbeladung an absorbierendem Material rückgeschlossen.

30

$$\text{TRANS} = -100 \ln \frac{T}{T_0} = \sigma_{\text{TRANS}} S_{BC} \quad (1a)$$

$$REF = -100 \ln \frac{R}{R_0} = 2\sigma_{REF} S_{BC} \quad (1b)$$

Hierbei bezeichnen T und  $T_0$  bzw. R und  $R_0$  die Transmissivitäten und Reflektivitäten der partikelbeladenen (kein Index) und der partikelfreien (Index 0) Filtermatrix. Mit  $S_{BC}$  wird die flächenspezifische Beladung des Filters mit schwarzem Kohlenstoff (in  $\mu\text{gcm}^{-2}$ ) bezeichnet,  $\sigma_{ATN}$  sowie  $\sigma_{REF}$  sind die Proportionalitätsfaktoren zwischen der Filterbeladung  $S_{BC}$  und der Lichtabschwächung aufgrund der Partikelbeladung in Durchlicht ( $\sigma_{TRANS}$ ) bzw. in Reflexion ( $\sigma_{REF}$ ). Vielfachstreueffekte im Aerosol oder zwischen Partikeln und Filtermatrix werden vernachlässigt.

In US 4,893,394 ist ein Aethalometer beschrieben, in welchem eine Lichtquelle und ein einziger Lichtdetektor sowie zwei Lichtwege von der Lichtquelle zu dem Lichtdetektor vorgesehen sind. Ferner ist ein Quarzfaserfilter vorgesehen, dessen Aufnahmefläche in dem einem Lichtweg liegt, während der andere Lichtweg als Referenzbereich dient. Durch den Aufnahmebereich des Filters wird Umgebungsluft geleitet, so dass sich Aerosolpartikel auf dem Filter absetzen können. In dem Aethalometergehäuse ist eine rotierenden Scheibe mit einer Öffnung vorgesehen, so dass alternierend Licht von der Lichtquelle die beiden Lichtwege durchläuft. Die Ausgangsspannung des unter dem Filter angeordneten Detektors wird an einen spannungsgesteuerten Oszillatoren (VCO) angelegt. Die Pulse zur Bestimmung der Lichttransmission, die gesondert durch die beiden Lichtwege geleitet werden, werden gezählt und verglichen; daraus wird dann der Absorptionskoeffizient der abgeschiedenen Aerosolpartikel bestimmt.

- Bei dem bekannten Aethalometer werden die Partikel auf ein  
Filter bzw. Filterband abgeschieden; damit ist man in der La-  
ge, die Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs über  
einen längeren Zeitraum, je nach Konzentration bis zu mehreren  
Monaten, zu bestimmen. Da bei dem bekannten Aethalometer Viel-  
fachstreueffekte nach Gl.(1a) vernachlässigt werden, besteht  
aufgrund des angewendeten Messprinzips eine Abhängigkeit der  
ermittelten Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs von  
den lichtstreuenden Aerosolkomponenten. Diese Querempfindlich-  
keit kann zu deutlichen Verfälschungen der Messwerte führen.  
Außerdem ist der Lufteinlass nicht für größere Partikeldurch-  
messer geeignet.
- Zum Bestimmen des Gehalts an schwarzem Kohlenstoff in atmo-  
sphärischen Aerosolproben ist ein optischer Aufbau vorgestellt  
worden, mit welchem gleichzeitig transmittierte und reflek-  
tierte Strahlung gemessen werden kann. (Siehe: Petzold, A. and  
H. Kramer, An improved aerosol absorption photometer for the  
determination of black carbon in ambient aerosol, Journal of  
Aerosol Science, 32, S.37-38, 2001) Hierbei werden Aerosole  
auf einem Filterband abgeschieden und der mit Aerosolpartikel  
belegte Bereich wird mit einer LED beleuchtet. Sowohl in dem  
Bereich zwischen der als Beleuchtungsquelle dienenden Photodi-  
ode und dem Filterband als auch unter dem Filterband sind Photo-  
tordetektoren angeordnet, so dass gleichzeitig sowohl durch das  
Filterband transmittierte Lichtanteile als auch von dem Fil-  
terband reflektierte Lichtanteile gemessen werden können.
- Aufgabe der Erfindung ist es, das Messen und damit das Bestim-  
men von transmittierten und reflektierten Lichtanteilen so zu  
verbessern, dass dadurch eine bessere Signalmitteilung über ei-  
ne ausgedehnte Fläche erreicht wird.

Gemäß der Erfindung ist diese Aufgabe durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Verfahrensanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des Verfahrens sind Gegenstand der auf den Anspruch 1 unmittelbar oder mittelbar rückbezogenen 5 Ansprüche. Ferner ist eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens angegeben.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein mit Aerosolpartikeln belegter Flächenbereich eines Filterbandes kontinuierlich 10 von einer Beleuchtungsquelle mit Licht bei einer oder mehreren Wellenlängen beleuchtet. Ferner werden transmittierte und reflektierte Lichtanteile unter mehreren genau festgelegten Winkel 15 bzw. Winkelbereichen, die vorzugsweise bei  $0^\circ$ , 120 bis  $140^\circ$  und von  $165$  bis  $180^\circ$  liegen, mittels entsprechend angeordneter Photodetektoren relativ zur Beleuchtungsquelle gemesen, wodurch eine maximale Symmetrie für zu messende Winkel 20 erzielt wird. Die Belegung des Flächenbereichs des Filterbandes mit lichtabsorbierendem Aerosolmaterial wird aus der durch die Belegung hervorgerufene Veränderung der optischen Eigenschaften des mit Aerosolpartikeln belegten Flächenbereichs mit Hilfe bekannter Algorithmen kontinuierlich aus den ermittelten Transmissitäten und Reflektivitäten bestimmt.

Gemäß der Erfindung sind zum Messen von transmittierten und 25 reflektierten Lichtanteilen die Photodetektoren unter genau festgelegten Winkeln bzw. Winkelbereichen von  $0^\circ$ , 120 bis  $140^\circ$  und  $165$  bis  $180^\circ$  einander gegenüberliegend, vorzugsweise in ringförmigen Halterungsvorrichtungen untergebracht, die konzentrisch bezüglich der optischen Achse der mindestens einen 30 Beleuchtungsquelle angeordnet sind. Aufgrund der dadurch erreichten maximalen Symmetrie in der gemäß der Erfindung vorgesehenen Mehrwinkelmessanordnung für die zu messenden Winkelbereiche wird insgesamt eine bessere Signalmittelung über eine

ausgedehnte Filterfläche bei einem sehr kompakten Aufbau der Messeinrichtung in Form eines Messkopfes erzielt.

Zur Reduzierung von Streulicht sind die ringförmig ausgebildeten Halterungsvorrichtungen, in denen die einander gegenüberliegenden Photodetektoren untergebracht sind, vorzugsweise in zwei unterschiedlichen Ebenen festgelegt.

Anstelle einer beispielsweise bei dem bekannten Aethalometer

vorgesehenen Referenzstrecke wird gemäß der Erfindung die Lichtintensität der Beleuchtungsquelle kontinuierlich dadurch gemessen, dass der Beleuchtungsquelle ein Photodetektor zugeordnet ist.

Ferner ist im Messkopf ein Bestaubungskanal so ausgebildet, dass eine kontinuierliche Bestaubung des Filterbandes gewährleistet ist. Über diesen Bestaubungskanal können auch größere Partikel ( $> 10\mu\text{m}$ ) auf das Filterband gelangen. Darüber hinaus können zur Größenselektion der Partikel vor dem Bestaubungskanal extern Vorabscheider angeordnet sein.

Bei einer Messung mit nur einer Wellenlänge wird eine schmalbandige Lichtquelle, wie eine farbige Leuchtdiode eingesetzt. Bei einer Messung bei mehreren Wellenlängen wird eine breitbandige Lichtquelle eingesetzt und ein Bandfilter vor einzelnen Detektoren vorgesehen.

Nachfolgend wird die Erfindung im einzelnen beschrieben. Es zeigen:

Fig.1 in einer vertikalen Schnittansicht eine Ausführungsform einer Einrichtung in Form eines Messkopfes für eine Wellenlänge;

Fig.2 eine stark vereinfachte perspektivische Darstellung einer Messanordnung;

5 Fig.3 ein Diagramm der Winkelverteilung von in den beiden Halbräumen gestreuten Strahlungen in Abhängigkeit von der Zusammensetzung eines Aerosols;

10 Fig.4 eine graphische Darstellung des Verhältnisses der Signale bei unterschiedlichen Beobachtungswinkeln  $\theta$ ;

15 Fig.5 eine graphische Darstellung eines Signalverhältnisses von Detektoren unter Beobachtungswinkeln  $\theta = 130^\circ$  bzw.  $100^\circ$  in Abhängigkeit vom Anteil diffus gestreuter Strahlung, und

20 Fig.6 eine graphische Darstellung von Messgrößen TRANS (Transmission), REF (Reflektion) bzw. ABS (Mehrwinkelabsorptionsmessung) als Funktion einer gemessenen Beladung des Filters mit schwarzem Kohlenstoff.

In Fig.1 ist schematisiert eine Einrichtung in Form eines in seiner Gesamtheit mit 1 bezeichneten Messkopfes dargestellt. Im oberen Teil eines Messkopfgehäuses 10 ist als Beleuchtungsquelle eine LED 2 beispielsweise für eine Wellenlänge  $\lambda=670\text{nm}$  vorgesehen. Zur Überwachung der Lichtintensität ist zur Kontrolle der LED 2 ein Photodetektor 3 zugeordnet. Im mittleren Bereich des oberen Gehäuseteils 10 sind zum Messen zurückgestreuter (reflektierter) Strahlung zwei Photodetektoren 4 und etwas tiefer zwei weitere Photodetektoren 5 vorgesehen.

Zwischen dem oberen Messgehäuseteil 10 und einem unteren Messgehäuseteil 11 ist ein durch eine stark ausgezogene Linie an-

gedeutetes Filterband 6 vorgesehen. In dem unteren Gehäuseteil 11 ist unterhalb des Filterbandes 6 ein weiterer Photodetektor 9 zum Messen bzw. Erfassen von transmittierter Strahlung angeordnet. Ferner ist im unteren Bereich des oberen Gehäuseteils 5 10 ein Bestaubungskanal 12 vorgesehen, der so ausgebildet ist, dass eine kontinuierliche Bestaubung des Filterbandes 6 gewährleistet ist.

Wie der stark vereinfachten perspektivischen Darstellung von 10 Fig.2 zu entnehmen ist, sind unterhalb der Beleuchtungsquelle in Form der LED 2 zum Erfassen von rückgestreuter Strahlung auf einer ersten ringförmigen Halterungsvorrichtung 7<sub>1</sub> vorzugsweise in gleichen Winkelabständen voneinander vier Photodetektoren 4<sub>1</sub> bis 4<sub>4</sub> vorgesehen, während etwas tiefer auf einer 15 zweiten ringförmigen Halterungsvorrichtung 7<sub>2</sub> ebenfalls vier Photodetektoren 5<sub>1</sub> bis 5<sub>4</sub> vorgesehen sind.

In Fig.2 befindet sich auf dem Filterband 6 ein mit Aerosolpartikeln belegter Flächenbereich 8. Unterhalb der Filterbandes 6 ist der Photodetektor 9 für transmittierte Strahlung vorgesehen. In der perspektivischen Darstellung sind die reflektierte Strahlung betreffenden Winkel, und zwar die Winkel  $\theta = 0^\circ$ ;  $\theta_1 = 130^\circ$  und  $\theta_2 = 165^\circ$  eingetragen.

25 In den beiden ringförmigen Halterungsvorrichtungen 7<sub>1</sub> und 7<sub>2</sub> sind immer zwei Photodetektoren einander gegenüberliegend angeordnet, beispielsweise in der ersten ringförmigen Halterungsvorrichtung 7<sub>1</sub> die Photodetektoren 4<sub>1</sub> und 4<sub>3</sub> bzw. 4<sub>2</sub> und 4<sub>4</sub> sowie in der tiefer angeordneten, zweiten ringförmigen Halterungsvorrichtung 7<sub>2</sub> die Photodetektoren 5<sub>1</sub> und 5<sub>3</sub> bzw. 5<sub>2</sub> und 5<sub>4</sub>. Wie Fig.2 zu entnehmen ist, sind die ringförmigen Halterungsvorrichtungen 7<sub>1</sub> und 7<sub>2</sub> konzentrisch zu der strichpunkt-

tiert angedeuteten optischen Achse des Messkopfes 1 angeordnet.

Auf Grund dieser Anordnung der Photodetektoren 4 bzw. 5 in  
 5 Form von jeweils zwei einander gegenüberliegenden Detektoren ist bezüglich der Beleuchtungsquelle in Form der LED 2 eine maximale Symmetrie hinsichtlich der Winkelmessanordnung für die zu messenden Winkelbereiche erzielt. Auf diese Weise ist bei einem sehr kompakten Aufbau des Messkopfes eine bessere  
 10 Signalmittelung über dem ausgedehnten Flächenbereich 8 auf dem Filterband 6 erreicht.

Die optimale Position der Detektoren 4, 5 zur Ermittlung der gesamten transmittierten und zurückgestreuten Strahlung wurde  
 15 aus der Analyse der Winkelverteilung der belegten Filter ermittelt. Diese Analyse zeigte, dass die Winkelverteilungen durch eine Linearkombination aus einem Anteil einer diffus gestreuten Strahlung und einem Anteil einer an einer rauhen Oberfläche gespiegelten Strahlung dargestellt werden können.  
 20 Die parameterisierten Winkelverteilungen lassen sich darstellen als

$$S(\theta) = I \cos \theta \quad (2a)$$

(für den vorderen Halbraum,  $\theta = 0-90^\circ$ )

25

und

$$S(\theta) = l \left( \alpha \cos \theta + (1-\alpha) \exp \left[ -\frac{l \theta^2}{2\sigma^2} \right] \right) \quad (2b)$$

(für den rückwärtigen Halbraum  $\theta = 90-180^\circ$ )

30

Hierbei bezeichnen  $\alpha$  den Anteil diffus gestreuter Strahlung und  $\sigma$  die Rauigkeit der Filteroberfläche (Siehe hierzu auch Fig.3). In Fig.3 ist die Winkelverteilung der in den vorderen 5 Halbraum ( $\theta = 0 - 90^\circ$ ) und in den rückwärtigen Halbraum ( $\theta = 90 - 180^\circ$ ) gestreuten Strahlung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Aerosols wiedergegeben. Hierbei ist die Aerosolzusammensetzung angegeben als Anteil der Licht absorbierenden Komponenten schwarzer Kohlenstoff (Black Carbon; BC) 10 an der Gesamtmasse. In dem Graphen ist auf der Abszisse der Streuwinkel  $\theta$  in Grad und auf der Ordinate die normierte Streuintensität aufgetragen.

Die Positionierung eines Detektors bei  $\theta_1 = 130^\circ$  erlaubt die 15 Unterscheidung zwischen diffus gestreuter und gespiegelter Strahlung mit größtmöglicher Auflösung (siehe Fig.4). In Fig.4 ist auf der linksseitigen Achse/Ordinate das Verhältnis der Signale bei den Beobachtungswinkeln  $\theta$  und  $\theta = 165^\circ$  als Funktion des diffusen Anteils an der Streustrahlung und auf der 20 rechten Y-Achse/Ordinate die Differenz der Signalverhältnisse für vollständig diffuse und vollständig reflektierte Strahlung als Funktion des Beobachtungswinkels  $\theta$  aufgetragen.

Der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Signalverhältnis 25  $S(\theta_1)/S(\theta_2)$  und dem diffusen Anteil an der rückgestreuten Strahlung ist linear (Siehe Fig.5). In Fig.5 ist das Signalverhältnis der Detektoren unter dem Beobachtungswinkeln  $130^\circ$  bzw.  $100^\circ$  und  $165^\circ$  in Abhängigkeit vom Anteil der diffusen 30 Streuung wiedergegeben. Hierbei ist auf der Abszisse der Anteil  $\alpha$  an diffuser Streuung und auf der Ordinate das Verhältnis  $S(\theta)/S(165^\circ)$  aufgetragen.

Somit lässt sich aus dem gemessenen Signalverhältnis der diffuse Anteil  $\alpha$  eindeutig ermitteln. Mit der Bestimmung des Parameters  $\alpha$  kann schließlich die gesamte, in den rückwärtigen Halbraum gestreute Strahlung aus Gl.(2b) berechnet werden. Für 5 die Ermittlung der in den vorderen Halbraum transmittierten Strahlung nach Gl.(1) genügt eine Messung bei  $\theta = 0^\circ$ .

Die so ermittelten Gesamtintensitäten sind für den vorderen Halbraum

$$I_t = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\theta = 0^\circ) \cos \theta d\theta = 2S(\theta = 0^\circ) \quad (3)$$

und für den rückwärtigen Halbraum

$$\begin{aligned} I_r &= \alpha \int_{\pi/2}^{3\pi/2} S(\theta = 180^\circ) \cos \theta d\theta + (1-\alpha) \int_{\pi/2}^{3\pi/2} S(\theta = 180^\circ) \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\theta^2}{\sigma^2}\right] d\theta \\ &= S(\theta = 180^\circ) (2\alpha + (1-\alpha)\sqrt{2\pi}\sigma) \end{aligned} \quad (4)$$

Aus diesen Strahlungsintensitäten wird die durch die deponierten Partikel hervorgerufene Lichtabsorption über einen bekannten Algorithmus bestimmt. (Siehe Hänel G., Radiation budget of the boundary layer, Part II, Simultaneous Measurement of mean solar volume absorption and extinction coefficient of particles, Phys. Atmosph., 60, 241-247, 1987) Der Algorithmus liefert als Resultat die optische Dicke  $\tau_L$  des mit den Partikeln belegten Filters und das Verhältnis  $\omega_0$  von Lichtstreuung zu Lichtextinktion (Einfachstreuualbedo) am belegten Filter. Aus 20 diesen Parametern wird schließlich die Massenbelegung des Filters mit lichtabsorbierendem Aerosol  $S_{BC}$  bestimmt über  
25

$$ABS = 100(1 - \omega_0) \quad \tau_L = \sigma_{ABS} S_{BC} \quad (5)$$

Der Parameter  $\sigma_{ABS}$  kann durch die Kalibrierung des Verfahrens gegen eine chemische Methode zur Ermittlung des schwarzen Kohlenstoffs (z.B. VDI 2465, Part 1) im Aerosol ermittelt werden.

#### Anwendungsbeispiel

Das beschriebene Verfahren wurde angewendet auf die Bestimmung des schwarzen Kohlenstoffs in einem Gemisch aus Licht streuenden (Kochsalz NaCl) und absorbierenden (schwarzer Kohlenstoff BC) Komponenten. Der Massenanteil des schwarzen Kohlenstoffs variierte zwischen 1% und 100%. Bei einem idealen Verfahren ist die durch die Partikelbeladung des Filters hervorgerufene Änderung der optischen Filtereigenschaften (Transmissivität, Gl. (1a), Reflektivität Gl. (1b), Absorptionsstärke Gl. (5)) der Beladung des Filters mit schwarzem Kohlenstoff direkt proportional und wird damit durch eine Ursprungsgerade dargestellt.

In Fig. 6 ist die Beziehung zwischen den Messgrößen *TRANS*, *REF* bzw. *ABS* und der unabhängig nach VDI 2465, Blatt 1 gemessenen Beladung des Filters mit schwarzem Kohlenstoff für eine Transmissionsmessung (*TRANS*), Reflektivitätsmessung (*REF*) und für die beschriebene Methode (*ABS*) dargestellt.

Tabelle 1 gibt die zugehörigen Resultate der Korrelationsanalyse wieder. Die vorstehend beschriebene Mehrwinkelabsorptionsmessung weist somit eine hohe Korrelation bei gleichzeitigem Nulldurchgang der Regressionsgeraden auf. Die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Methoden zeigen entweder eine starke Streuung der Messwerte (Transmission) oder einen signifikant von Null verschiedenen Achsenabschnitt (Re-

flektivität). Damit ist die zu erwartende Verbesserung der Bestimmung des schwarzen Kohlenstoffs in der Luft durch die beschriebene Mehrwinkelabsorptionsmessung belegt werden.

- 5 In der nachfolgenden Tabelle 1 ist eine Korrelationsanalyse des Zusammenhang zwischen der Messgröße der Transmissionsmessung (*TRANS*), Reflektivitätsmessung (*REF*) und Mehrwinkelabsorptionsmessung Methode (*ABS*) und der nach VDI 2465, Blatt 1 gemessenen Beladung des Filters mit schwarzem Kohlenstoff wie-  
10 dergegeben.

Tabelle 1

	<i>TRANS</i>	<i>REF</i>	<i>ABS</i>
<i>n</i>	28	28	28
<i>r</i> <sup>2</sup>	0,62	0,89	0,91
Achsenabschnitt	0	17,3 ± 4,5	0
Steigung	7,2±0,5	2,8±0,2	3,3±0,1

- 15 Weitere Gebiete für eine gewerbliche Anwendung sind:  
eine kontinuierliche Kontrolle der Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs in Immission in Umweltmessnetzen,  
eine Messung der Emission von schwarzem Kohlenstoff aus Verbrennungsprozessen (Kfz-Motore, Flugzeugtriebwerke, Feuerungsanlagen),  
eine Arbeitsplatzüberwachung, beispielsweise in Werkshallen, an LKW-Laderampen, bei Schiffsverladungen);  
eine Lüftungskontrolle, beispielsweise in Werkshallen oder Tunneln in Form einer Tunnelüberwachung.

## Bezugszeichenliste:

- 1        Messkopf
- 2        LED
- 5     3       Photodetektor
- 4, 4<sub>1</sub> bis 4<sub>4</sub>    Photodetektoren
- 5, 5<sub>1</sub> bis 5<sub>4</sub>    Photodetektoren
- 6       Filterband
- 7<sub>1</sub>, 7<sub>2</sub>   ringförmige Halterungsvorrichtung
- 10    8       Flächenbereich
- 9       Photodetektor
- 10      Messkopfgehäuse
- 11      unterer Messgehäuseteil
- 12      Bestaubungskanal
- 15    20, 21   Einheiten zum Bestimmen  
              der Belegung des Filterbandes

## Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Messung von schwarzem Kohlenstoff  
5 in der Atmosphäre, wobei Aerosole aus einem Luftstrom auf ei-  
nen Filterband abgeschieden werden, der mit Aerosolpartikel  
belegte Bereich beleuchtet wird, und mittels Photodetektoren  
sowohl durch das Filterband transmittierte Lichtanteile als  
auch von dem Filterband reflektierte Lichtanteile gleichzeitig  
gemessen werden, dadurch **gekennzeichnet**, dass

10 der mit Aerosolpartikeln belegte Flächenbereich des Filterban-  
des kontinuierlich von einer Beleuchtungsquelle mit Licht bei  
einer oder mehreren Wellenlängen beleuchtet wird;

15 die transmittierten und reflektierten Lichtanteile unter meh-  
reren genau festgelegten Winkeln bzw. Winkelbereichen mittels  
entsprechend angeordneter Photodetektoren relativ zur Beleuch-  
tungsquelle gemessen werden, wodurch eine maximale Symmetrie  
für zu messende Winkel erzielt wird, und

die Belegung des Flächenbereichs des Filterbandes mit Licht

20 absorbierendem Aerosolmaterial aus der durch die Belegung her-  
vorgerufenen Veränderung der optischen Eigenschaften des Flä-  
chenbereichs mit Hilfe bekannter Algorithmen kontinuierlich  
aus ermittelten Transmissitäten und Reflektivitäten bestimmt  
wird.

25

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, dass die  
transmittierten und die reflektierten Lichtanteile unter Win-  
keln bzw. Winkelbereichen von 0°, 120 bis 140° und 165 bis  
180° gemessen und anschließend gemittelt wird.

30

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch **gekennzeichnet**, dass bei Messen mit nur einer Wellenlänge eine schmalbandige Lichtquelle eingesetzt wird.

5 4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch **gekennzeichnet**, dass als schmalbandige Lichtquelle eine farbige Leuchtdiode verwendet wird.

10 5. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, dadurch **gekennzeichnet**, dass bei Messen mit mehreren Wellenlängen eine breitbandige Lichtquelle verwendet wird und Bandfilter vor den einzelnen Lichtdetektoren eingesetzt werden.

15 6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch **gekennzeichnet**, dass kontinuierlich die Lichtintensität der Beleuchtungsquelle gemessen und bestimmt wird.

20 7. Einrichtung zum Durchführen des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6, in Form eines Messkopfes (1) mit einer über einem Filterband (6) angeordneten Beleuchtungsquelle (2), mit einem Photodetektor (7) unter dem Filterband (6) zum Messen der transmittierten Lichtanteile und mit im Bereich zwischen Beleuchtungsquelle (2) und dem Filterband (6) angeordneten Photodetektoren (4, 5) zum Messen der reflektierten Lichtanteile, dadurch **gekennzeichnet**, dass jeweils mindestens zwei der zwischen Beleuchtungsquelle (2) und Filterband (6) angeordneten Photodetektoren ( $4_1, 4_3; 4_2, 4_4; 5_1, 5_3; 5_3, 5_4$ ) bezogen auf die optische Achse der Lichtquelle (2) einander gegenüberliegend in ringförmigen Halterungsvorrichtungen ( $7_1, 7_2$ ) vorgesehen und unter genau festgelegten Winkeln bzw. Winkelbereichen  $\theta$  von  $0^\circ$ ,  $120$  bis  $140^\circ$  und  $165$  bis  $180^\circ$  bezüglich der Filterband-Oberfläche ausgerichtet sind, und

dem Photodetektor (9) unter dem Filterband (6) sowie den einander gegenüberliegend angeordneten Photodetektoren (4, 5) Einheiten (20, 21) zum Bestimmen der Belegung des Filterbandes mit Licht absorbierendem Material nachgeordnet sind.

5

8. Einrichtung nach Anspruch 7, dadurch **gekennzeichnet**, dass zur Reduzierung von Streulicht die einander gegenüberliegend vorgesehenen Photodetektoren (4, 5) auf in zwei unterschiedlichen Ebenen liegenden ringförmigen Halterungsvorrichtungen (7<sub>1</sub>, 10 7<sub>2</sub>) untergebracht sind.

9. Einrichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch **gekennzeichnet**, dass zum Überwachen der Lichtintensität der Beleuchtungsquelle eine Lichtdiode (3) vorgesehen ist.

15

10. Einrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch **gekennzeichnet**, dass im Messkopf (1) ein Bestaubungskanal (12) so ausgebildet ist, dass neben einer kontinuierlichen Bestaubung des Filterbandes (6) auch größere Partikel (> 10µm) auf 20 das Filterband gelangen.

11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch **gekennzeichnet**, dass zur Größenselektion der Partikel vor dem Bestaubungskanal (12) ein Vorabscheider vorgesehen ist.

## Zusammenfassung

5

Zur optischen Messung von schwarzem Kohlenstoff in der wird ein mit Aerosolpartikeln belegter Flächenbereich eines Filterbandes kontinuierlich von einer Beleuchtungsquelle mit Licht bei einer oder mehreren Wellenlängen beleuchtet. Transmittierte und reflektierte Lichtanteile werden unter mehreren genau

festgelegten Winkeln bzw. Winkelbereichen, wie  $0^\circ$ , 120 bis  $140^\circ$  und 165 bis  $180^\circ$  mittels entsprechend angeordneter Photodetektoren relativ zur Beleuchtungsquelle gemessen, wodurch eine maximale Symmetrie für zu messende Winkel erzielt wird.

Die Belegung des Flächenbereichs des Filterbandes mit Licht absorbierendem Aerosolmaterial wird aus der durch die Belegung hervorgerufenen Veränderung der optischen Eigenschaften des Flächenbereichs mit Hilfe bekannter Algorithmen kontinuierlich aus ermittelten Transmissitäten und Reflektivitäten bestimmt.

20

Fig. 1

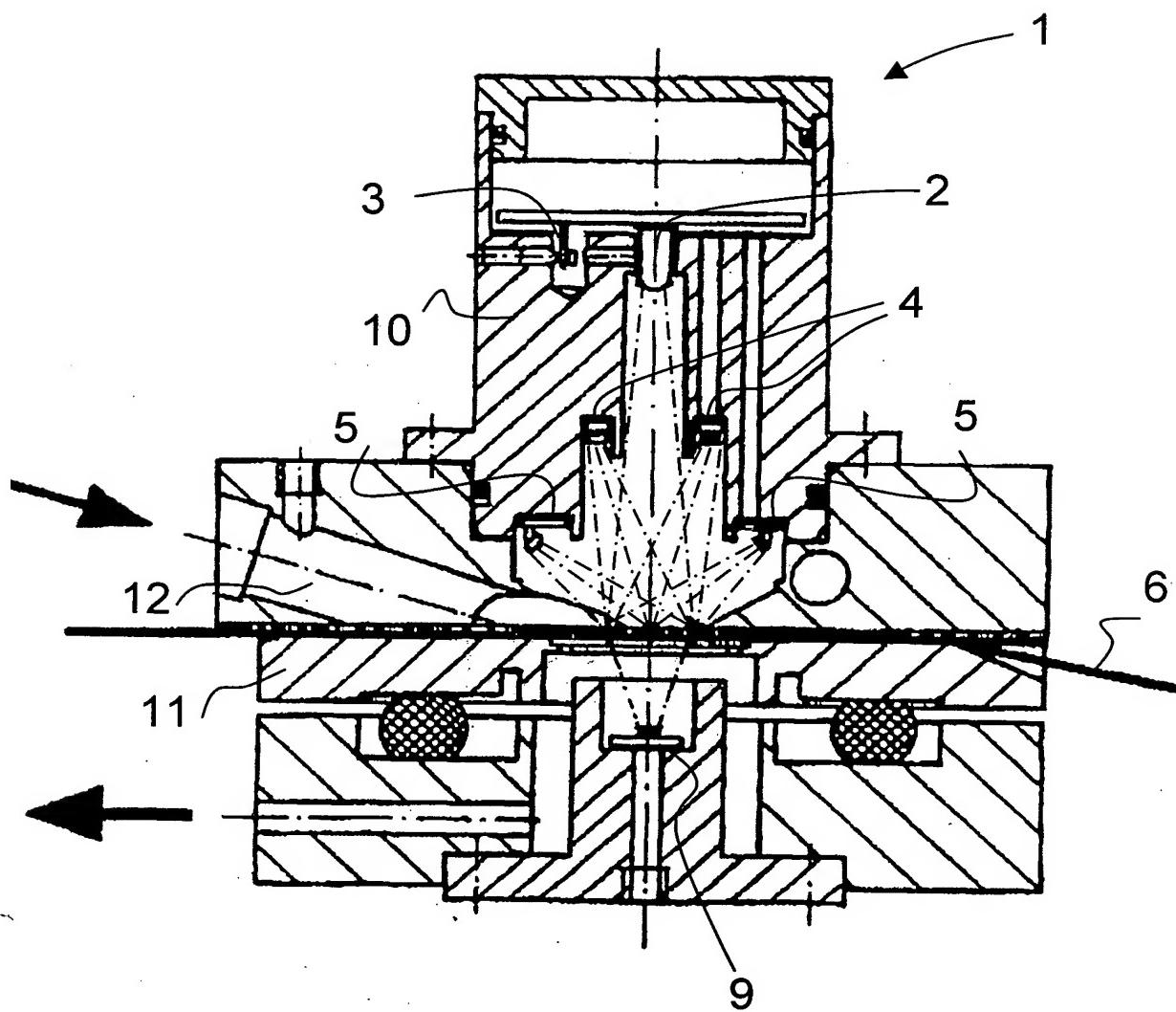
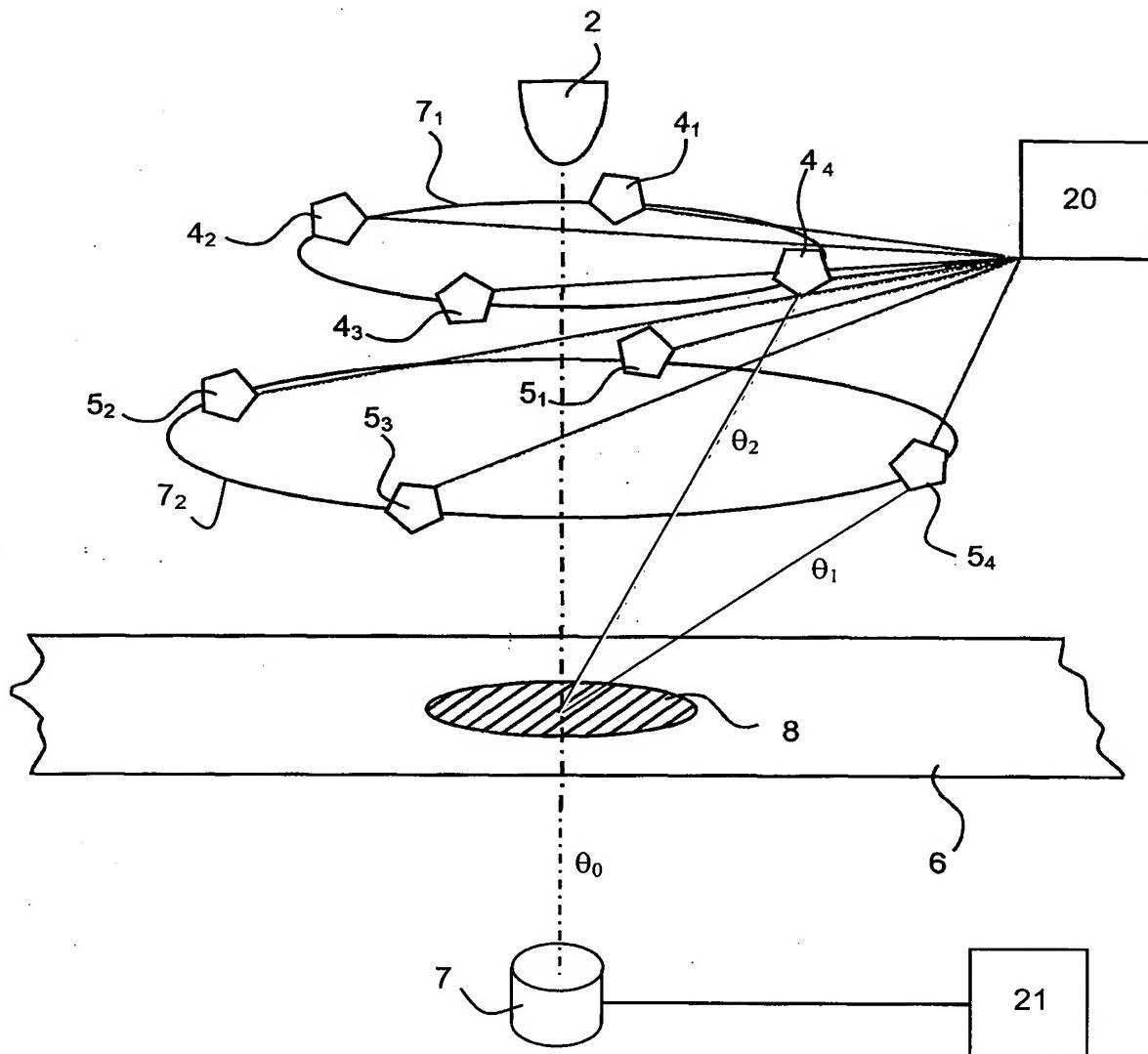


Fig.2



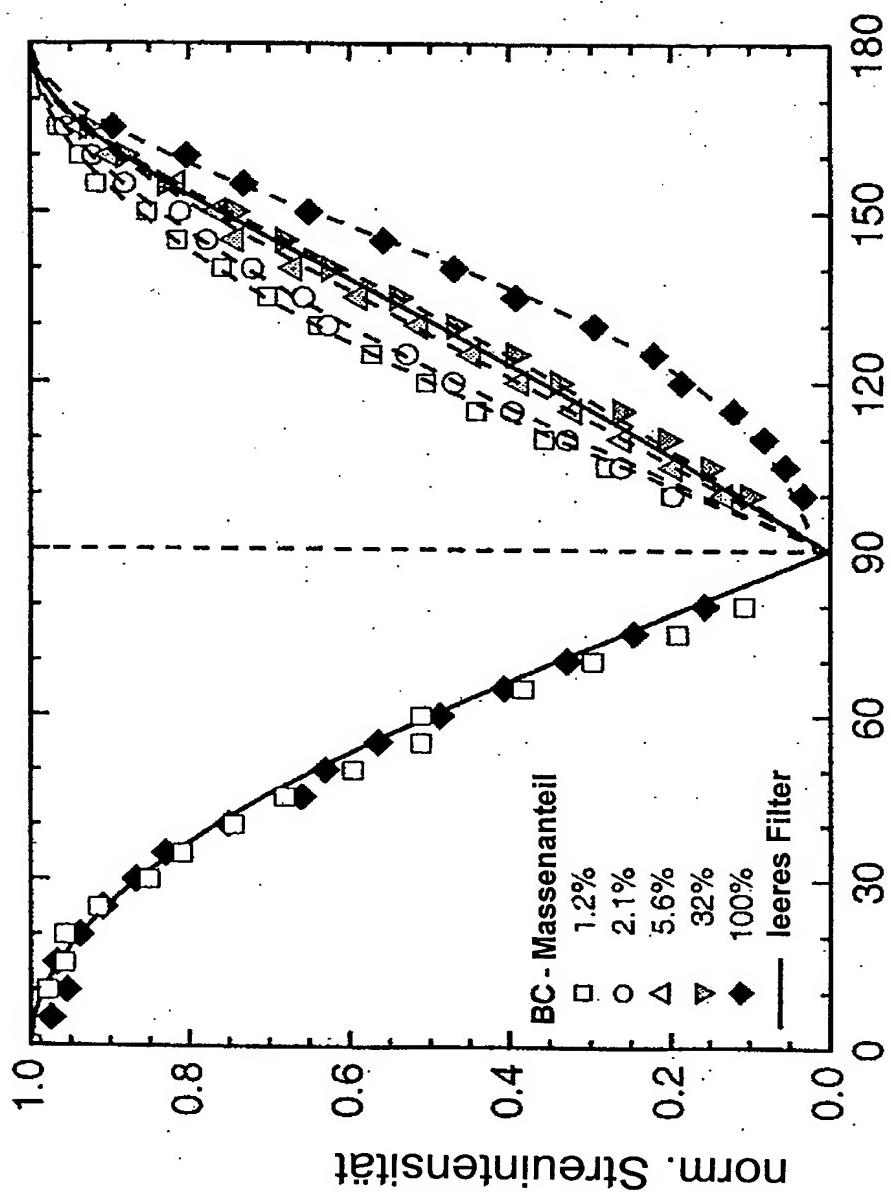


Fig. 3

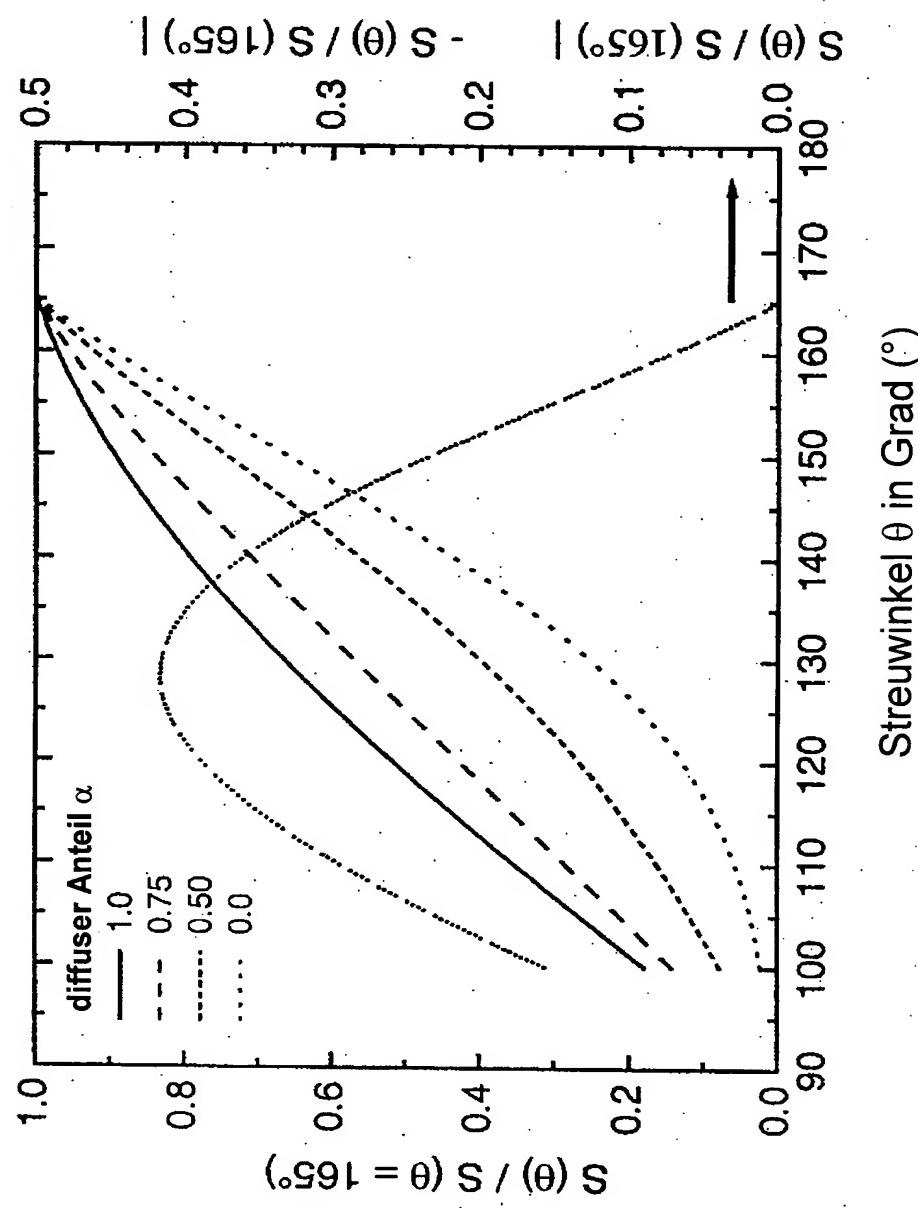
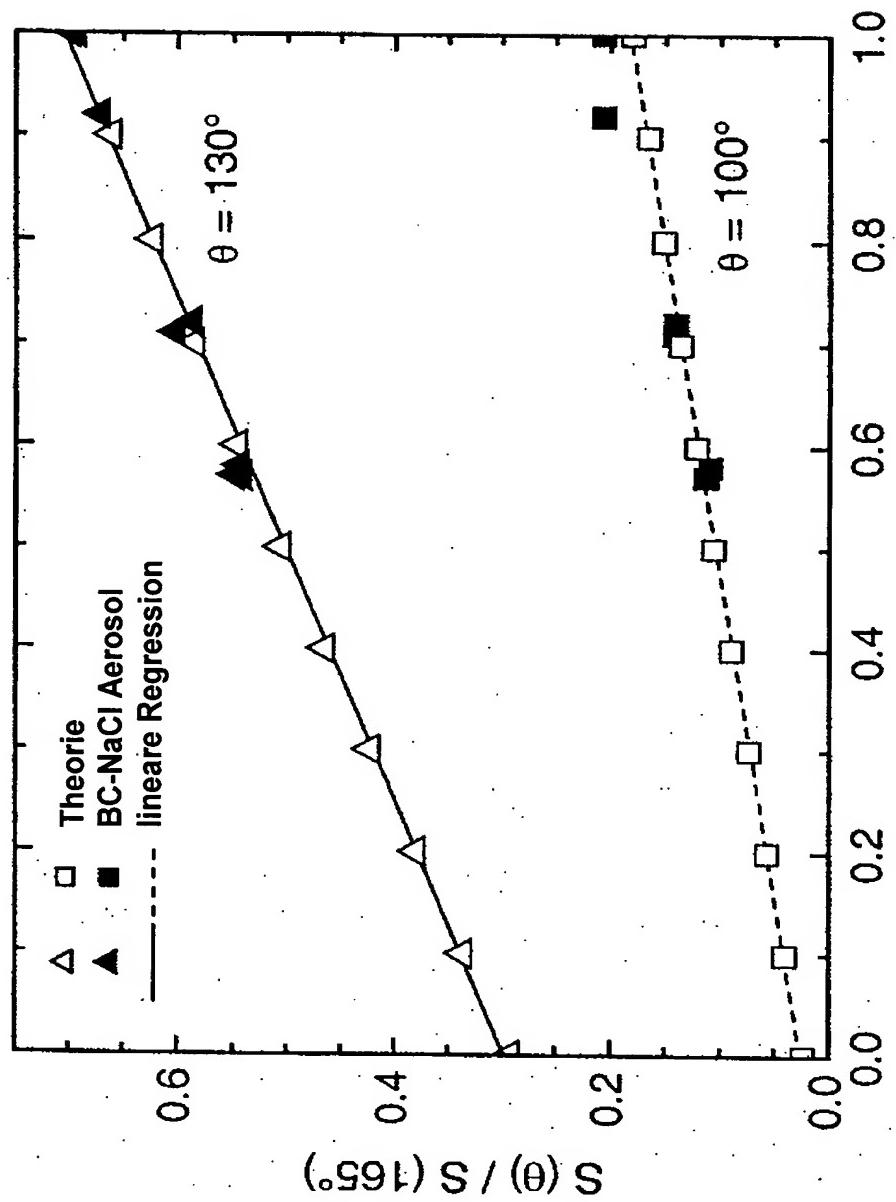


Fig.4



Anteil an diffuser Streuung  $\alpha$

Fig. 5

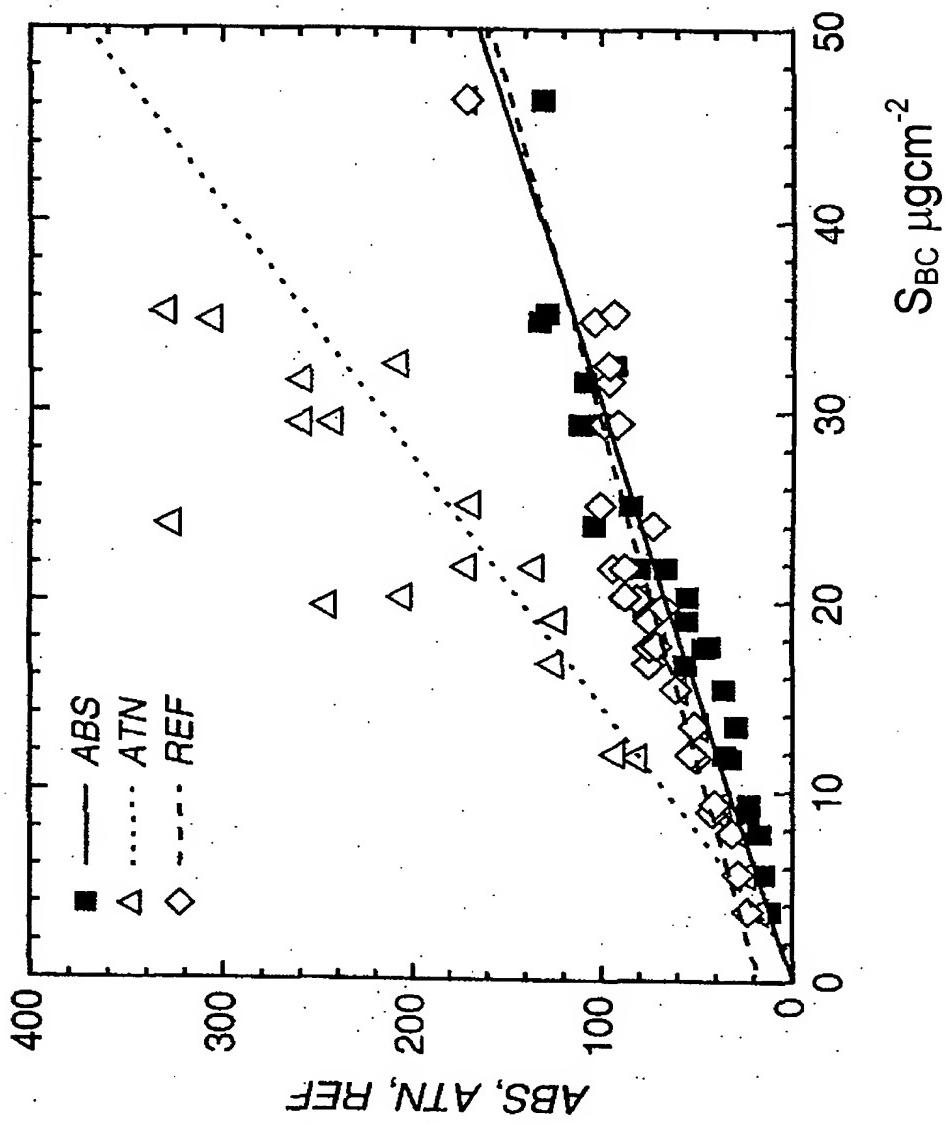


Fig.6